

Respuesta de la frecuencia cardiaca de anticipación y recuperación en función del nivel de entrenamiento aeróbico

Virginia G. Zamorano, Ana B. Peinado, Pedro J. Benito, Francisco J. Calderón

Departamento de Salud y Rendimiento Humano. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte – INEF. Universidad Politécnica de Madrid.

Recibido: Resumen
Aceptado:

Palabras clave:
Frecuencia cardiaca de
recuperación. Frecuencia
cardiaca de anticipación.
Entrenamiento de resistencia.
Sistema nervioso autónomo.

Introducción: La frecuencia cardiaca (FC) se considera un parámetro fundamental para valorar la intensidad del ejercicio y prescribir las cargas de entrenamiento adecuadas para un mayor rendimiento físico.

Objetivo: Evaluar y comparar la respuesta de la frecuencia cardiaca de anticipación (FC_{ant}) y de recuperación (FC_{rec}) en el primer minuto del ejercicio y del post-esfuerzo durante una prueba de esfuerzo máxima en dos grupos con distinto nivel de entrenamiento aeróbico.

Material y métodos: Se realizó una prueba máxima en cicloergómetro con 66 ciclistas de élite y 51 estudiantes de Educación Física. Se registró la FC durante toda la prueba y se analizó la respuesta de la misma a los 20 s, 30 s y 1 min en el primer minuto del calentamiento y de la recuperación. Se aplicó la prueba T-Student para muestras no relacionadas y se realizó un ANOVA de medidas repetidas, con un nivel de significación del 5%.

Resultados: Los ciclistas tuvieron una mejor respuesta de la FC_{ant} hasta los primeros 30 segundos (ciclistas vs. estudiantes: $16,3 \pm 12,2$ vs. $10,3 \pm 12,9$ latidos·min⁻¹, $p < 0,05$), recuperando también mejor a partir de los 30 segundos de finalizar el ejercicio (ciclistas vs. estudiantes: $20,2 \pm 8,3$ vs. $16,0 \pm 10,3$ latidos·min⁻¹, $p < 0,05$). A su vez, la pendiente de la FC de recuperación fue mayor que la pendiente de anticipación (excepto a los 20 segundos), independientemente del nivel de entrenamiento. También, se observó una respuesta no lineal de la FC de anticipación frente a la siempre lineal FC de recuperación.

Conclusiones: La frecuencia cardiaca de anticipación (FC_{ant}) y de recuperación (FC_{rec}) guardó relación con el grado de entrenamiento aeróbico, pudiendo ser un buen indicador de adaptación cardiovascular.

Response of anticipatory and heart rate recovery as a function of aerobic training level

Summary

Introduction: Heart rate (HR) is considered a fundamental parameter to assess the intensity of an exercise and prescribe training loads appropriate for increased physical performance.

Objectives: To compare the variation in anticipatory and heart rate recovery in the first minute during a maximal exercise test, between two different groups of subjects with different aerobic training levels.

Material and methods: It was carried out a maximal test using a cycle ergometer, with 66 elite cyclists and 51 sport sciences students. Their heart rate was recorded throughout the test and it was calculated the anticipatory and heart rate recovery at 20 s, 30 s and 1 min of the first warm-up minute and recovery. Student's t-test for independent samples and repeated measures ANOVA were used with statistical significance at the 5% level.

Results: Cyclists had a better anticipatory heart rate for the first 30 s (cyclists vs. students: 16.3 ± 12.2 vs. 10.3 ± 12.9 beats·min⁻¹, $p < 0.05$), having better heart rate recovery 30 s after finishing exercising as well (cyclists vs. students: 20.2 ± 8.3 vs. 16.0 ± 10.3 beats·min⁻¹, $p < 0.05$). Similarly, the slope of the FC recovery was greater than anticipatory of heart rate (except for second 20), independent of the training level. Also, it was observed the non-linear anticipatory heart rate against FC recovery always linear.

Conclusions: The anticipatory heart rate (FC_{ant}) and recovery (FC_{rec}) was related to the aerobic level and it may be a good indicator of cardiovascular adaptation.

Key words:
Heart rate recovery.
Anticipatory heart rate.
Endurance exercise.
Autonomic nervous system.

Introducción

Un parámetro fundamental para valorar la intensidad de un ejercicio y prescribir cargas de entrenamiento, es la respuesta lineal de la frecuencia cardiaca (FC) a un incremento creciente de carga¹. Si consideramos el ejercicio físico como una situación de estrés para el organismo, parece fundamental comprender de qué manera el entrenamiento físico aeróbico realizado de forma habitual puede influir en una FC de anticipación (FC_{ant}) y una FC de recuperación (FC_{rec}) más eficaz a esa situación estresante. Hay diversos estudios que indican, que una pobre recuperación de la frecuencia cardiaca tras un esfuerzo físico (FC_{rec}), tiene relación con una alta predicción de muerte por distinto origen² ($<12 \text{ latidos} \cdot \text{min}^{-1}$ en el primer minuto de recuperación). Sin embargo, mucha menos relevancia se le ha dado a la respuesta el corazón en los primeros momentos de iniciar un ejercicio (FC_{ant}) y a la posible relación entre ambas (FC_{ant} - FC_{rec}) cuando se parte de distinto nivel de entrenamiento aeróbico. Todo ello plantea nuevos e interesantes interrogantes, como ¿está ligada la mayor recuperación de los deportistas de élite con una mayor anticipación?, ¿existe una adaptación de los mecanismos nerviosos que desencadenan ambos fenómenos?

La actividad cardiaca está bajo la influencia del sistema nervioso vegetativo a través de su componente simpático y parasimpático. Las fibras postganglionares simpáticas y preganglionares parasimpáticas convergen en plexos nerviosos que forman una red en la base del corazón, de forma que la confluencia de las terminaciones nerviosas de los dos sistemas da una idea de su interacción y dependencia²⁻⁵. Así en el nódulo sinusal y en el seno aurículo-ventricular, el efecto de la actividad eferente simpática disminuye si el nivel de actividad parasimpática es alta y viceversa. También hay que tener en cuenta que los ganglios autonómicos parasimpáticos están ubicados en el propio órgano efector (en este caso llevando una información de “retardo o desaceleración” al corazón, a través del nervio vago), mientras que los ganglios simpáticos están en la cadena paravertebral, llevando una información de “activación” al corazón, vasos sanguíneos y médula suprarrenal y regular así esa actividad cardiaca². Por último, la actividad del sistema nervioso autónomo está regulada por el sistema nervioso central, o por lo que comúnmente se llama como “comando central”⁴, que regulará en todo momento la respuesta autónoma sobre el sistema cardiovascular, en función de las necesidades del organismo en cada momento⁴.

Son numerosas las adaptaciones que se producen como consecuencia de un mayor nivel de entrenamiento aeróbico, lo que se asocia a su vez a una mejora en el equilibrio simpático vagal que modifica la actividad eléctrica del corazón. Entre esas adaptaciones neurológicas están: a) menor FC de reposo (FC_{basal}), por un mayor predominio vagal en el corazón del deportista, situación alcanzada por una menor activación del sistema nervioso simpático a través de interacciones pre/postganglionares en el corazón, y por un menor número de aferencias simpáticas procedentes de los mecanorreceptores de los músculos en reposo⁶⁻⁸; b) mayor sensibilidad del barorreflejo, para regular las variaciones puntuales de presión arterial como consecuencia de la acción del sistema nervioso simpático⁹⁻¹²; c) menor FC submáxima durante el ejercicio, lo que le permite alcanzar mayores intensidades de trabajo antes de alcanzar su FC máxima (FC_{max})¹³⁻¹⁵; d) mejora de la acción del sistema nervioso simpático-adrenérgico durante el ejercicio, lo que mejora los mecanismos de retroalimentación, tanto centrales como periféricos y

la mayor contractilidad del corazón^{8,16,17}; e) mejor FC_{rec} a los 30 s y 1 min por la mayor influencia parasimpática¹⁸⁻²⁰.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar y comparar la respuesta de la frecuencia cardiaca de anticipación (FC_{ant}) y de recuperación (FC_{rec}) en el primer minuto del ejercicio y del post-esfuerzo durante una prueba de esfuerzo máxima en dos grupos con distinto nivel de entrenamiento aeróbico. Además, como objetivo secundario se comparó, por un lado, la pendiente (Pend) y el coeficiente de determinación (R^2) de la frecuencia cardiaca entre ambos grupos, y por otro, el patrón de respuesta de la FC de anticipación y de recuperación en cada uno de los grupos independientemente. Como hipótesis se establece que la respuesta de la FC_{ant} y la FC_{rec} aumentará cuanto mayor sea el nivel de entrenamiento aeróbico, siendo la respuesta de recuperación siempre mayor a la de anticipación independientemente del nivel de entrenamiento.

Material y métodos

Participantes

Se seleccionó para el estudio un grupo de ciclistas de élite ($22,7 \pm 3,9$ años, $69,8 \pm 7,2$ kg, $176,9 \pm 6,5$ cm; $n=66$) y un grupo de estudiantes de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte ($23,6 \pm 4,0$ años, $73,1 \pm 7,7$ kg, $178,1 \pm 5,2$ cm; $n=51$) en ambos casos de sexo masculino y en perfecto estado de salud. Los estudiantes eran considerados físicamente activos (realizaban actividad física de forma regular al menos 3 días/semana, un mínimo de 30 minutos de forma continuada). Todos los participantes fueron voluntarios y seleccionados aleatoriamente para el presente estudio. La principal característica diferenciadora de los dos grupos fue su distinto nivel de aptitud cardiovascular (Tabla 1). Previamente a la realización del estudio todos los sujetos fueron informados verbalmente y por escrito de las características, objetivos y riesgos del estudio. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado elaborado de acuerdo con las normas de la Declaración de Helsinki para la investigación con seres humanos.

Protocolo

Todos los participantes en el estudio realizaron una prueba incremental en rampa hasta el agotamiento en cicloergómetro. Antes de iniciarse la prueba de esfuerzo, a cada sujeto se le realizó un examen médico, consistente en la historia clínica y deportiva, electrocardiograma (ECG) basal y espirometría. Las pruebas se realizaron sobre un cicloergómetro Jaeger ER800® (Erich Jaeger, Alemania) de resistencia variable y freno electromagnético, que fue ajustado por cada participante para adoptar una posición cómoda durante la prueba. Se les aportó en todo momento apoyo verbal para asegurar que su esfuerzo durante la prueba fuese máximo. El protocolo de esfuerzo utilizado consistió en un minuto totalmente en reposo sobre el cicloergómetro, 3 minutos de calentamiento a 50 W y una fase incremental en rampa con incrementos de 5 W cada 12 segundos (25 W/min), hasta llegar al agotamiento. Finalizado el esfuerzo, se realizaban dos minutos de recuperación activa a 50 W y 3 minutos en reposo completo en la bicicleta. La cadencia de pedaleo se estableció entre 70 y 90 rpm. Todas las pruebas se llevaron a cabo bajo similares condiciones atmosféricas (21-24°C, 45-55% de humedad relativa y presión atmosférica comprendida entre

700 y 715mmHg). Todos los sujetos tenían experiencia previa con este tipo de protocolo, el cual es habitualmente usado para la evaluación fisiológica de ciclistas^{1,21}. Para asegurar que la prueba fuese máxima y se alcanzase el máximo consumo de oxígeno (VO_{2max}), al menos dos de los siguientes criterios debían de cumplirse^{1,21}: aplanamiento del consumo de oxígeno (VO_2), cociente respiratorio superior a 1,1 ($RER \geq 1,1$), alcanzar el 95% de la frecuencia cardiaca máxima estimada para su edad ($FC_{max} = 220 - \text{edad}$) e indicación de agotamiento por parte del sujeto. Las mediciones de composición y volumen del aire espirado durante la prueba, se realizaron con un equipo Jaeger Oxicon Pro® (Erich Jaeger, Alemania). El analizador de gases está provisto de un sistema de autocalibración que desecha las calibraciones con variaciones de $\pm 2\%$ con respecto a los valores estandarizados. Este analizador ha sido validado previamente en varios trabajos publicados^{22,23}, obteniéndose una diferencia de medias para el VO_2 de $0,0 \pm 0,21 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Para la monitorización cardiaca se utilizó un equipo de electrocardiografía modelo Hellige Cardiotest EK 53 (Hellige, Freiburg).

Medidas y variables

En la prueba de esfuerzo se determinaron las siguientes variables máximas: VO_{2max} tanto en valores absolutos como relativos al peso corporal (VO_{2max}/kg), y ventilación y FC máximas (VE_{max} y FC_{max} respectivamente). Además también se registró la FC en reposo (FC_{basal}) y la FC previa al inicio del calentamiento (FC_{previa}).

En cuanto a la respuesta cardiaca de anticipación (ant) y recuperación (rec) al ejercicio, se midió la FC y se calculó la pendiente (Pend) y R^2 de las rectas de regresión. La FC en los 20 s, 30 s y 1 min, se calculó como la diferencia de la FC entre el primer segundo y el segundo 20, 30 y 60 respectivamente, teniendo registros de la FC cada 5 s durante toda la prueba. En la anticipación se analizó el primer minuto de calentamiento y para la recuperación se estudió el primer minuto de recuperación activo (Figura 1). Se calcularon las funciones de regresión lineal sobre la gráfica de evolución de la FC_{ant} y FC_{rec} en 20 s, 30 s y 1 minuto, de esta manera se obtuvo la Pend y el R^2 . Además se determinó la FC en el primer y segundo minuto de recuperación (FCR_{1min} y FCR_{2min} respectivamente). Por último, se calculó el índice de recuperación de Lamiel-Luengo²⁴ en el primer y segundo minuto de la recuperación (IR_{1min} y IR_{2min} respectivamente) para conocer el número exacto de latidos recuperados en ese tiempo (ecuación 1).

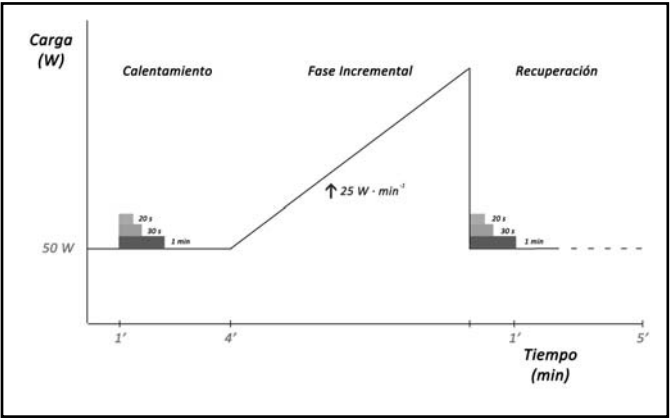
$$IR_{1min, 2min} = (FC_{max} - FCR_{1min, 2min}) / (FC_{max} / FC_{previa})$$

Ecuación 1. Índice de recuperación propuesto por Lamiel-Luengo.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante el programa estadístico SPSS versión 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). El análisis de las variables FC_{basal} , VO_{2max} , VO_{2max}/kg , VE_{max} , FC_{max} , FC_{max} , FC_{previa} , FCR_{1min} y FCR_{2min} , IR_{1min} e IR_{2min} en función del grupo de estudio (ciclistas vs. estudiantes) se realizó mediante la prueba t para muestras independientes. El análisis de la respuesta anticipatoria y de recuperación, así como de la Pend y el R^2 , se realizó mediante ANOVAS de dos factores inter x intrasujetos (grupo de estudio x momento de medida) con medidas repetidas. Las comparaciones múltiples a posteriori se realizaron mediante la prueba

Figura 1. Protocolo de la prueba de esfuerzo y tiempos analizados.



de Bonferroni. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar (D.E.). El nivel de significación estadística se fijó en 0,05.

Resultados

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos al comparar las principales variables medidas en función del grupo de estudio (ciclistas vs. estudiantes). Se obtuvieron diferencias significativas en todas las variables estudiadas, excepto en la FC_{max} ($p=0,213$).

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la FC_{ant} y FC_{rec} . Existió una interacción significativa entre el grupo estudiado (ciclistas vs. estudiantes) y el momento de medida (FC_{ant} vs. FC_{rec}) en 1 min de tiempo

Tabla 1. Variables ergoespirometricas.

| Variables | Ciclistas | Estudiantes |
|-----------------------|--------------------|---------------------|
| FC_{basal} | 68,3 \pm 12,2 | 75,0 \pm 12,2* |
| VO_{2max} | 4979,2 \pm 636,4 | 3889,6 \pm 675,0* |
| VO_{2max}/Kg | 71,6 \pm 8,7 | 53,3 \pm 7,9* |
| VE_{max} | 168,7 \pm 26,3 | 147,5 \pm 30,8* |
| FC_{max} | 188,8 \pm 8,8 | 184,2 \pm 12,7* |
| FC_{max} | 197,3 \pm 3,9 | 196,4 \pm 4,0 |
| FC_{previa} | 75,3 \pm 13,1 | 80,9 \pm 13,5* |
| FCR_{1min} | 152,6 \pm 12,4 | 160,5 \pm 10,7* |
| FCR_{2min} | 128,2 \pm 11,8 | 137,2 \pm 12,9* |
| IR_{1min} | 34,8 \pm 10,9 | 23,4 \pm 13,4* |
| IR_{2min} | 57,2 \pm 11,8 | 45,3 \pm 16,3* |

Todos los resultados se muestran como media \pm D.E. FC_{basal} : FC de reposo; VO_{2max} : Consumo máximo de oxígeno; VO_{2max}/kg : Consumo máximo de oxígeno relativo al peso corporal; VE_{max} : Ventilación máxima; FC_{max} : FC máxima; FC_{max} : FC máxima teórica; FC_{previa} : FC previa al inicio del calentamiento; FCR_{1min} : FC en el primer minuto de recuperación; FCR_{2min} : FC en el segundo minuto de recuperación; IR_{1min} : Índice de recuperación de Lamiel-Luengo en el primer minuto de la recuperación; IR_{2min} : índice de recuperación de Lamiel-Luengo en segundo minuto de la recuperación. * Diferencias significativas con ciclistas ($p<0,05$, intergrupos).

analizado, mientras que esta interacción no fue significativa ni en los 20 s ni en los 30 s de tiempo analizados ($p=0,129$ y $p=0,546$, a los 20 s y 30s respectivamente). En este caso, se estudió si existía relación entre pertenecer a un grupo u otro de estudio y los dos momentos de registro de la frecuencia cardiaca. También, la respuesta de la FC fue significativamente superior en el grupo de ciclistas comparado con el de estudiantes, en cualquiera de los intervalos de tiempo analizados. En este caso, se comparó la respuesta conjunta de la FC anticipación y la FC recuperación, entre los dos grupos de estudio. Del mismo modo, la respuesta de la FC_{rec} fue significativamente mayor que la FC_{ant} a los 30 s y 1 minuto de tiempo analizados, no encontrándose diferencias significativas entre FC_{ant} y FC_{rec} a los 20 s de tiempo analizado ($p=0,545$). En este caso, se comparó la respuesta de la FC de anticipación y de la FC de recuperación entre sí. En la Tabla 2 se muestran las diferencias intergrupos e intragrupos encontradas.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la $Pend_{ant}$ y $Pend_{rec}$. Existió una interacción significativa entre el grupo estudiado (ciclistas vs. estudiantes) y el momento de medida ($Pend_{ant}$ vs. $Pend_{rec}$) en todos los tiempos analizados. En este caso, se estudió si existía relación entre pertenecer a un grupo u otro de estudio y los dos momentos de registro de la frecuencia cardiaca. También, la $Pend$ fue significativamente superior en el grupo de ciclistas comparado con el grupo de estudiantes a los 30 s y 1 min de tiempo analizado, no encontrándose diferencias significativas en la $Pend$ entre los dos grupos a los 20 s ($p=0,082$). En este caso, se comparó la respuesta conjunta de la $Pend$ de anticipación y la $Pend$ de recuperación, entre los dos grupos de estudio. Del mismo modo, la $Pend_{rec}$ fue significativamente mayor que la $Pend_{ant}$ a los 30 s y 1 minuto de tiempo analizados, mientras que a los 20 s la $Pend_{ant}$ fue significativamente mayor que la $Pend_{rec}$. En este caso, se comparó la

respuesta de la $Pend$ de anticipación y la $Pend$ de recuperación entre sí. En la Tabla 3 se muestran las diferencias intergrupos e intragrupos encontradas.

En la Tabla 4 se muestran los resultados del R^2_{ant} y R^2_{rec} . No existió ninguna una interacción significativa entre el grupo estudiado (ciclistas vs. estudiantes) y el momento de medida (R^2_{ant} vs. R^2_{rec}) en los tiempos analizados ($p=0,979$, $p=0,881$ y $p=0,181$, a los 20 s, 30s y 1min respectivamente). En este caso, se estudió si existía relación entre pertenecer a un grupo u otro de estudio y los dos momentos de registro de la frecuencia cardiaca. También, la respuesta del R^2 fue significativamente superior en el grupo de ciclistas frente al grupo de estudiantes en todos los tiempos analizados. En este caso, se comparó la respuesta conjunta del R^2 de anticipación y del R^2 de recuperación, entre los dos grupos de estudio. Del mismo modo, la R^2_{rec} fue significativamente mayor que la R^2_{ant} en todos los tiempos analizados. En este caso, se comparó la respuesta del R^2 de anticipación y del R^2 de recuperación entre sí. En la Tabla 4 se muestran las diferencias intergrupos e intragrupos encontradas.

Discusión

El principal hallazgo de este trabajo es la mejor respuesta de la FC_{ant} en los primeros 30 s y la mejor FC_{rec} a partir de los 30 s de finalizar el ejercicio, en el grupo de ciclistas estudiados. Además la $Pend_{ant}$ y $Pend_{rec}$ fue mayor en el grupo de ciclistas en los primeros 30 s y a partir de los 30 s de finalizar el ejercicio, respectivamente. A su vez, al comparar la respuesta de anticipación con la de recuperación se observa que la respuesta de FC_{rec} y la $Pend_{rec}$ siempre es mayor que la FC_{ant} y $Pend_{ant}$ respectivamente a partir de los 30 s, independientemente del nivel de entrenamiento.

Tabla 2. Frecuencia cardiaca de anticipación y FC de recuperación.

| | | 20s | Intervalos de tiempo analizados 30s | 1min |
|---|-------------|--------------|--|---------------------------|
| FC_{ant} (latidos·min ⁻¹) | Ciclistas | 15,7 ± 9,4 | 16,3 ± 12,2 | 13,3 ± 10,6 |
| | Estudiantes | 11,4 ± 11,1* | 10,3 ± 12,9* | 9,6 ± 10,3 |
| FC_{rec} (latidos·min ⁻¹) | Ciclistas | 13,1 ± 5,8 | 20,2 ± 8,3 ^a | 37,2 ± 10,8 ^a |
| | Estudiantes | 12,5 ± 8,5 | 16,0 ± 10,3* ^b | 27,4 ± 13,2* ^b |

Todos los resultados se muestran como media ± D.E. FC: Frecuencia cardiaca; FC_{ant} : FC de anticipación; FC_{rec} : FC de recuperación. *Diferencias significativas con ciclistas ($p<0,05$, intergrupos); ^aDiferencias significativas con FC_{ant} en ciclistas ($p<0,05$, intragrupo). ^bDiferencias significativas con FC_{ant} en estudiantes ($p<0,05$, intragrupo).

Tabla 3. Pendiente de anticipación y recuperación.

| | | 20s | Intervalos de tiempo analizados 30s | 1min |
|--------------|-------------|-------------------------|--|--------------------------|
| $Pend_{ant}$ | Ciclistas | 4,5 ± 3,1 | 2,9 ± 2,4 | 0,6 ± 1,2 |
| | Estudiantes | 3,0 ± 2,8* | 1,7 ± 2,2* | 0,4 ± 1,1 |
| $Pend_{rec}$ | Ciclistas | -3,3 ± 1,5 ^a | -3,4 ± 1,4 ^a | -3,2 ± 1,1 ^a |
| | Estudiantes | -3,1 ± 2,3 ^b | -2,7 ± 1,9* ^b | -2,2 ± 1,2* ^b |

Todos los resultados se muestran como media ± D.E. $Pend$: Pendiente; $Pend_{ant}$: $Pend$ de anticipación; $Pend_{rec}$: $Pend$ de recuperación. *Diferencias significativas con ciclistas, ($p<0,05$, intergrupos); ^aDiferencias significativas con $Pend_{ant}$ en ciclistas ($p<0,05$, intragrupos). ^bDiferencias significativas con $Pend_{ant}$ en estudiantes, ($p<0,05$, intragrupos).

Tabla 4. R² de anticipación y R² de recuperación.

| | | Intervalos de tiempo analizados | | |
|-------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | 20s | 30s | 1 min |
| R ² _{ant} | Ciclistas | 0,7 ± 0,26 | 0,56 ± 0,30 | 0,29 ± 0,27 |
| | Estudiantes | 0,53 ± 0,29* | 0,39 ± 0,28* | 0,21 ± 0,24 |
| R ² _{rec} | Ciclistas | 0,83 ± 0,23 ^a | 0,87 ± 0,19 ^a | 0,92 ± 0,10 ^a |
| | Estudiantes | 0,66 ± 0,31 ^{*b} | 0,69 ± 0,28 ^{*b} | 0,77 ± 0,23 ^{*b} |

Todos los resultados se muestran como media ± D.E. R²: Coeficiente determinación; R²_{ant}: R² de la anticipación; R²_{rec}: R² de la recuperación. *Diferencias significativas con ciclistas (p<0,05, intergrupos); ^aDiferencias significativas con FC_{ant} en ciclistas (p<0,05, intragrupo). ^bDiferencias significativas con FC_{ant} en estudiantes (p<0,05, intragrupo).

El nivel de entrenamiento aeróbico y la alteración del equilibrio simpático-vagal hacia un mayor predominio del sistema parasimpático en el corazón entrenado^{6,8,10,24-26}, podría dar explicación a los resultados encontrados en el grupo de ciclistas: mayor VO_{2max'}, VO_{2max/kg'}, VE_{max'}, FC_{max'}, IR_{1min'}, IR_{2min'} y menor FC_{basal'}, FC_{previa'}, FCR_{1min'}, FCR_{2min'}; en comparación con los estudiantes.

La mejor FC_{ant} y Pend_{ant} encontrada hasta los 30s en el grupo de ciclistas, aun teniendo una menor FC_{basal} y FC_{previa} que el grupo de estudiantes, se podría deber a su mayor dominio parasimpático, su mayor sensibilidad barorrefleja y su menor influencia simpática en reposo^{8,15,25}. Ese incremento inicial de la actividad cardiaca es proporcionalmente mayor en el grupo de ciclistas que en el grupo de estudiantes, para la misma carga de trabajo, lo cual tiene sentido si se tiene en cuenta que la respuesta de anticipación prepara fisiológicamente al cuerpo para hacer frente a un mayor esfuerzo posterior (con un aumento del gasto cardiaco, de la ventilación, de la disponibilidad de nutrientes, etc.)²⁷. Los ciclistas profesionales están más acostumbrados a alcanzar mayores intensidades de trabajo, por lo que su corazón entrenado se debe anticipar mejor a ese esfuerzo, para hacer frente a esa mayor demanda de sangre. Estos mismos argumentos podrían explicar que la Pend_{ant} fuese superior a la Pend_{rec} a los 20 s únicamente en los ciclistas. Al mismo tiempo para valorar esa respuesta de anticipación se decidió coger el primer minuto del calentamiento (tras un 1 minuto de reposo absoluto encima del cicloergómetro) para intentar aislar el posible estrés psicológico al comienzo de la prueba máxima²⁸.

Numerosas investigaciones indican que ese incremento inicial de FC se debe a la influencia de centros nerviosos superiores, y a la acción de determinados mecanorreceptores musculares (tipo III) que al ser activados, mandan una información aferente al corazón^{25,29-31}. El efecto combinado de ambos aumenta la actividad simpática sobre el corazón, incrementándose la FC, pero con pocos cambios en la presión arterial, por lo que no intervendría el barorreflejo, e inhibiendo el tono vagal de reposo²⁹. El no haber encontrado diferencias significativas en la FC_{ant} a partir de los 30 s entre los grupos, se puede atribuir a que un incremento excesivamente rápido de la FC perjudicaría el ajuste adecuado del corazón a las intensidades crecientes de carga. De esa forma, la respuesta de anticipación en el primer minuto no responde bien a una relación lineal, sólo encontrada en los primeros 20 s, en contra de la siempre respuesta lineal de la recuperación en ambos grupos. El papel exacto que juega el “comando central” en esa respuesta anticipatoria está aún lejos de ser entendida, pero recientes investigaciones muestran que determinadas estructuras subcorticales (núcleos PAG “periaqueductal grey area”) incrementan su activación durante la anticipación³².

Si bien se carece del registro de catecolaminas, así como otras hormonas de estrés (adrenocorticotropa y cortisol), la influencia del sistema simpático-adrenérgico tuvo que ser mayor en el grupo de ciclistas para responder a ese mayor esfuerzo³³, así como una mejor participación refleja de barorreceptores, quimiorreceptores y mecanorreceptores musculares^{10,15,26,34}. Investigaciones recientes^{9,35} muestran que la mayor producción intrínseca de neuromoduladores como el óxido nítrico en personas sometidas a ejercicio crónico, facilita la transmisión colinérgica vagal en los barorreceptores arteriales, atenuándose así la actividad simpática, hecho que podría explicar una mejor recuperación en el grupo de ciclistas.

En cuanto a la recuperación, la FC y la pendiente a partir de los 30 s fue mayor en el grupo de ciclistas probablemente debido a la rápida reactivación del sistema parasimpático^{6,7,13,25,36,37}, el progresivo debilitamiento del sistema simpático especialmente cuando la intensidad del ejercicio ha sido alta^{8,15,16,19}, y por una mayor sensibilidad barorrefleja^{10,38}. Ese ejercicio intenso produciría una mayor alteración de la homeostasis en los ciclistas, por lo que los mecanismos de “reajuste” para devolver al corazón a un estado vagal también tendrían que ser más rápidos. De hecho, en el grupo de ciclistas los índices de recuperación (IR_{1min} e IR_{2min}) fueron mayores y la FC_{rec} y Pend_{rec} superiores a la FC_{ant} y Pend_{ant} a partir de los 30 s. Además hubo una mayor respuesta lineal de la FC en la recuperación (R²_{rec}) frente a la anticipación (R²_{ant}) en cualquiera de los periodos de tiempo analizados. Hay que tener en cuenta que las fibras postganglionares parasimpáticas hacen su sinapsis directamente en el corazón, por lo que su respuesta será mucho más rápida y localizada que cuando se activa el sistema simpático-adrenérgico, debido a una respuesta más generalizada al liberar adrenalina al torrente sanguíneo desde la médula suprarrenal²³. Esto podría explicar la atenuación más progresiva del simpático en la recuperación. Si bien no nos parece lógico el no haber encontrado diferencias significativas en la FC_{rec} a los 20 s, eso indica que quizás haya que esperar más tiempo para valorar esa respuesta por la alta influencia del simpático, tal y como dice Savin (1982), que defiende que la retirada del simpático es lo más importante en la recuperación³⁹. Por lo tanto, la FC_{rec} a los 30 s podría ser un buen indicador para valorar esa respuesta cardiaca^{7,12}. Aunque en esta investigación no se ha medido la variabilidad de la frecuencia cardiaca, siendo el indicador más frecuentemente usado para valorar esa reactivación parasimpática, presumiblemente sería mayor en el grupo de ciclistas por su alta relación con la FC_{rec} y VO_{2max}^{8,14,16,35,40-42}. Por último, destacar que la recuperación activa utilizada en esta investigación también favoreció la recuperación, al ser necesaria una menor actividad vasoconstrictora mediada por el simpático, favoreciendo la FC_{rec} y la eliminación de lactato⁷.

Los bloqueos farmacológicos con atropina al final del ejercicio, son otro método muy utilizado para valorar esa reactivación parasimpática^{15,16}. En estos bloqueos se impide la unión de la acetilcolina con sus receptores muscarínicos, lo que implica una pobre recuperación en los dos primeros minutos y un alto pronóstico de mortalidad¹⁸. Si por el contrario se hace un bloqueo simpático con atenodol, la FC_{rec} a los 30 s no varía al margen de la intensidad del ejercicio, por lo que la FC_{rec} sería claramente dependiente en ese momento de la acción del parasimpático; sin embargo en la FC_{rec} a los 120 s, sí se encuentra una relación entre la recuperación y la intensidad del ejercicio realizado por influencia del simpático. Ese antagonismo acentuado entre los dos sistemas, también se observa en el mayor efecto parasimpático al acortar el intervalo QT del ECG y favorecer la repolarización ventricular, en presencia de tono simpático en comparación a si se hubiese bloqueado¹¹: a mayor intensidad del ejercicio más acción tendrá que ejercer el parasimpático para acortar el intervalo QT.

En resumen, los ciclistas estudiados, que tenían un mayor nivel de resistencia aeróbica, se anticiparon mejor al esfuerzo y recuperaron mejor a partir de los 30 s. Además la respuesta de la FC_{rec} y la $Pend_{rec}$ fue siempre mayor que la respuesta en la anticipación a partir de los 30 s, independientemente del nivel de entrenamiento, siendo más lineal el patrón de recuperación.

Bibliografía

- Lucia A, Rabadán M, Hoyos J, Hernández-Capilla M, Pérez M, San Juan A, *et al.* Frequency of the VO2max Plateau Phenomenon in World-Class Cyclists. *International journal of sports medicine*. 2006;27(12):984-92.
- Berne R, Bethesda M. *The heart. The cardiovascular system. Handbook of physiology*. R. M. Berne. Bethesda, Maryland: American Physiological Society. 1979.
- Levy M. Cardiac sympathetic-parasympathetic interactions. *Fed Proc*. [Research Support, U.S. Gov't, P.H.S.]. 1984;43(11):2598-602.
- Williamson J. The relevance of central command for the neural cardiovascular control of exercise. *Exp Physiol*. 2010;95(11):1043-8.
- Micheline L, Stern J. Exercise-induced neuronal plasticity in central autonomic networks: role in cardiovascular control. *Exp Physiol*. [Review]. 2009;94(9):947-60. Epub 2009 Jul 17.
- Buchheit M, Gindre C. Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2006;291(1):H451-8.
- Barak O, Grujic N, Ovcin Z, Jakovljevic D, Lozanov-Crvenkovic Z, Brodie DA. Recuperación de la Frecuencia Cardíaca después del Ejercicio Submáximo con Cuatro Protocolos de Recuperación Diferentes en Hombres Atletas y No Atletas. 2011.
- Gladwell V, Sandercock G, Birch S. Cardiac vagal activity following three intensities of exercise in humans. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2010;30(1):17-22. Epub 2009 Sep 10.
- Brack K, Patel V, Mantravadi R, Coote J, Ng G, Brack K, *et al.* Direct evidence of nitric oxide release from neuronal nitric oxide synthase activation in the left ventricle as a result of cervical vagus nerve stimulation. *J Physiol*. [Research Support, Non-U.S. Gov't]. 2009;15:587(Pt 12):3045-54. Epub 2009 Apr 29.
- Raven P, Fadel P, Ogoh S. Arterial baroreflex resetting during exercise: a current perspective. *Experimental physiology*. 2006;91(1):37-49.
- Sundaram S, Carnethon M, Polito K, Kadish A, Goldberger J. Autonomic effects on QT-RR interval dynamics after exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2008;294(1):H490-7.
- Yamamoto K, Miyachi M, Saitoh T, Yoshioka A, Onodera S. Effects of endurance training on resting and post-exercise cardiac autonomic control. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33(9):1496-502.
- Buchheit M, *et al.* Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2007;293(1):H133-41.
- Ng J, Sundaram S, Kadish A, Goldberger J. Autonomic effects on the spectral analysis of heart rate variability after exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2009;297(4):H1421-8.
- Goldberger J, Le F, Lahiri, Kannankeril P, Ng J, Kadish A. Assessment of parasympathetic reactivation after exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2006;290(6):H2446-52.
- Chen X, Mukkamala R. Selective quantification of the cardiac sympathetic and parasympathetic nervous systems by multisignal analysis of cardiorespiratory variability. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2008;294(1):H362-71.
- Tune J, Gorman M, Feigl E. Matching coronary blood flow to myocardial oxygen consumption. *J Appl Physiol*. [Research Support, Non-U.S. Gov't Research Support, U.S. Gov't, P.H.S. Review]. 2004;97(1):404-15.
- Baris Eea. Heart-Rate Recovery Index Is Impaired in Behçet's Disease. *Tex Heart Inst J*. 2009;36(4):282-6.
- Imai K, Sato H, Hori M, Kusuoka H, Ozaki H, Yokoyama H, *et al.* Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure. *J Am Coll Cardiol*. [Research Support, Non-U.S. Gov't]. 1994;24(6):1529-35.
- Nagashima J, Matsumoto N, *et al.* Dynamic component of sports in an important determinant factor of heart rate recovery. *Journal of Cardiology*. 2011;58:191-6.
- Lucía A, Hoyos J, Pérez M, Chicharro J. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2000;32(10):1777.
- Carter J, Keukendrup AE. Validity and reliability of three commercially available breath-by-breath respiratory systems. *Eur J Appl Physiol*. 2002;86(5):435-41.
- Rietjens GJ, Kuipers H, Kester AD, Keizer HA. Validation of a computerized metabolic measurement system (Oxycon-Pro) during low and high intensity exercise. *Int J Sports Med*. 2001;22(4):291-4.
- Calderon F, Cruz E, Montoya J. Estudio comparado de la recuperación de la frecuencia cardíaca en deportistas de fondo: triatletas, atletas, nadadores y ciclistas. *Área de fisiología del ejercicio-Rendimiento deportivo*. 2001;261.
- Coote J. Recovery of heart rate following intense dynamic exercise. *Exp Physiol*. 2009;95(3):431-40.
- Rowland T. Echocardiography and circulatory response to progressive endurance exercise. *Sports Med*. 2008;38(7):541-51.
- Calderon J, Legido J. *Neurofisiología aplicada al deporte*. Madrid: Editorial Tebar. 2002.
- Singh A, Petrides J, Gold P, Chrousos G, Deuster P. Differential hypothalamic-pituitary-adrenal axis reactivity to psychological and physical stress. *J Clin Endocrinol Metab*. [Clinical Trial Comparative Study Research Support, U.S. Gov't, Non-P.H.S.]. 1999;84(6):1944-8.
- Gladwell V, Fletcher J, Patel N, Elvidge L, Lloyd D, Chowdhary S, *et al.* The influence of small fibre muscle mechanoreceptors on the cardiac vagus in humans. *J Physiol*. 2005;567(Pt 2):713-21.
- Gladwell V, Coote J. Heart rate at the onset of muscle contraction and during passive muscle stretch in humans: a role for mechanoreceptors. *The Journal of physiology*. 2002;540(3):1095-102.
- Murata J, Matsukawa K. Cardiac vagal and sympathetic efferent discharges are differentially modified by stretch of skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2001;280(1):H237-H45.
- Green A, Wang S, Purvis S, Owen S, Bain P, Stein J, *et al.* Identifying cardiorespiratory neurocircuitry involved in central command during exercise in humans. *J Physiol*. 2007;578(Pt 2):605-12.
- de Vries W, Bernards N, de Rooij M, Koppeschaar H. Dynamic exercise discloses different time-related responses in stress hormones. *Psychosom Med*. 2000;62(6):866-72.
- Borresen J, Lambert M. Autonomic control of heart rate during and after exercise: measurements and implications for monitoring training status. *Sports Med*. 2008;38(8):633-46.
- Herring N, Paterson D. Neuromodulators of peripheral cardiac sympatho-vagal balance. *Exp Physiol*. 2009;94(1):46-53.
- Davirath L, Akselrod S, Pinhas I, Toledo E, Beck A, Elian D, *et al.* Evaluation of autonomic function underlying slow postexercise heart rate recovery. *Med Sci Sports Exerc*. 2006;38(12):2095-101.
- Hautala A, Rankinen T. Heart rate recovery after maximal exercise is associated with acetylcholine receptor M2 (CHRM2) gene polymorphism. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2006;291:H459-H66.
- Ebert T. Baroreflex responsiveness is maintained during isometric exercise in humans. *J Appl Physiol*. [Research Support, Non-U.S. Gov't]. 1986;61(2):797-803.
- Savin WM, Davidson DM, Haskell WL. Autonomic contribution to heart rate recovery from exercise in humans. *J Appl Physiol*. 1982;53(6):1572-5.
- Javorka M, Zila I. Heart recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity. *Brazilian Journal and Medical and Biology Research*. 2002;35:991-1000.
- Otsuki T, Maeda S, Iemitsu M, Saito Y, Tanimura Y, Sugawara J, *et al.* Postexercise heart rate recovery accelerates in strength-trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39(2):365-70.
- Toader E, Cividjian A, Quintin L. Recruitment of cardiac parasympathetic activity: effects of clonidine on cardiac vagal motoneurons, pressure lability, and cardiac baroreflex slope in rats. *Br J Anaesth*. 2009;102(3):322-30.